

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL PUENTE DE LA CONSTITUCIÓN DE 1812

Manuel Angel Díaz García^{1*}, Sergio Cicero González², Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^{1,3}

¹ APIAXXI LOUIS BERGER IDC. PCTCAN Av. Albert Einstein 6, 39011 Santander, Cantabria, España.

² LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

³ Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

* Persona de contacto: mdiaz@louisberger.com

RESUMEN

Para dar respuesta a los requerimientos de las normativas actuales se ha redactado un plan de inspección y mantenimiento para el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz (Cádiz) que define las tareas a realizar en los diferentes elementos del puente durante su vida útil. En el capítulo de inspección de la estructura metálica se ha incluido un apartado dedicado a la inspección de defectos o entallas que pueden producirse en el tablero metálico, aportando tamaños de fisura críticos por encima de los cuales quedaría comprometida la seguridad de la estructura. Para ello, en los puntos más solicitados del tablero se han identificado los detalles constructivos más susceptibles a fenómenos de fatiga y aparición de fisuras. Se han realizado ensayos de fatiga de estos detalles para completar un estudio de integridad estructural tendente a determinar la tenacidad a fractura del material y el tamaño de grieta crítica. Los ensayos se han realizado sobre probetas obtenidas con los mismos materiales (calidades de acero) utilizados en el puente y con los mismos procedimientos de soldeo practicados en la estructura. Los resultados obtenidos muestran que los tamaños de grieta críticos rondan los 12 mm, teniendo detalles estructurales con tamaños de grieta críticos de tan solo 6 mm.

PALABRAS CLAVE: Inspección, fatiga, fractura, tablero metálico.

ABSTRACT

As required by the latest regulations, an inspection and maintenance plan has been drafted for “Constitución de 1812 bridge over the Cádiz bay” (Cadiz), which defines the tasks to be performed in the different elements of the bridge during its useful life. In the part related to the inspection of the steel structure has a section dedicated to the inspection of defects or notches that can be produced in the steel deck, providing critical crack sizes above which would compromise the safety of the structure. For this, in the most stressed points of the board, the construction details more susceptible to phenomena of fatigue and appearance of fissures have been identified. Fatigue tests of these details have been performed to complete a structural integrity study to determine the fracture toughness of the material and the critical crack size. The tests were carried out on specimens obtained with the same materials (grades of steel) used in the bridge and with the same welding procedures practiced in the structure. The results show that critical crack sizes are around 12 mm, with structural details with critical crack sizes of only 6 mm.

KEYWORDS: Inspection, fatigue, fracture, steel deck.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace muy pocos años en nuestro país, fundamentalmente a raíz de las últimas revisiones de normas como la EHE-08 [1], EAE [2] o la IAP11 [3], se están destinando cada vez más recursos en la fase de proyecto y construcción, a la elaboración de manuales de inspección y mantenimiento que cubran el ciclo de

vida completo de las infraestructuras. En estos manuales se definen las tareas de inspección y mantenimiento a realizar en las distintas zonas o elementos de la obra y la periodicidad de estas tareas hasta el final de su vida útil.

A instancias del Ministerio de Fomento, estos documentos han sido elaborados para el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

incluyendo en este caso, dentro del capítulo de inspección de la estructura metálica, un apartado dedicado a la inspección de defectos como entallas o grietas que pueden producirse en el tablero metálico.

La estimación del valor máximo de entallas/grietas admisible se considera fundamental dentro de un plan de inspección y mantenimiento ya que permite:

- Garantizar el estado de servicio del puente.
 - Establecer el grado de seguridad frente al fallo de la estructura metálica fabricada.
 - Determinar los plazos de inspección para la estructura metálica en ausencia de grietas o modificar los plazos de inspección en el momento en el que se detecten agrietamientos.
 - Establecer los límites de uso del puente con garantías suficientes en función del tamaño de defecto encontrado.

En un trabajo futuro se aportarán cálculos de las posibles evoluciones de los agrietamientos en función de diferentes tipos de uso o escenarios, lo que permitirá gestionar adecuadamente las posibles reparaciones con garantías de un correcto funcionamiento.

2. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PUENTE

El Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz [4], ver figura 1, da acceso a la ciudad de Cádiz desde el término de Puerto Real, dando lugar al tercer acceso a la ciudad junto con el istmo a San Fernando y el Puente de Carranza.



Figura 1. Puente de la constitución de 1812.

Tiene una longitud total de 3.157 m con una sección transversal de 32,5 m de ancho formada por tres calzadas separadas por medianas. Dos de las calzadas, con dos carriles cada una, están destinadas al tráfico ligero y pesado y la otra calzada da servicio ahora como carril bus y en un futuro acogerá el tranvía que unirá Cádiz con Puerto Real, ver figura 2.

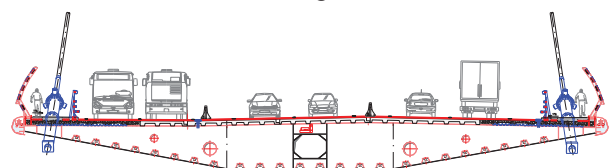


Figura 2. Sección del tablero del tramo atirantado.

El conjunto del puente se puede agrupar en 10 tramos atendiendo a la tipología del tablero, soporte y sección.

Tramos 1 y 2: Este tramo de 580 m está constituido por un vano inicial de 55 m de luz y siete vanos de 75 m de luz. La sección transversal del tablero es trapezoidal de estructura mixta con un núcleo central de 10 m y dos caras laterales de 11,6 m de anchura. El canto total de la sección es de 3,00 m, incluida una losa superior de hormigón, 0,3 m. Las pilas presentan una altura que oscila entre 7,8 m y 32 m.

Tramos 3 y 4: El puente desmontable, de 150 m de longitud, presenta un núcleo central formado por un cajón metálico de 10 m de ancho y alas inclinadas de 11,6 m de ancho.

Tramos 5, 6 y 7: Corresponden al puente atirantado y a sus vanos de compensación y constituye el tramo principal del puente. El vano principal es de 540 m y tiene un gálibo de 69 m. El canto total de la sección es de 3,00 m, incluida una losa superior de hormigón, 0,3 m. El puente atirantado se soporta en dos torres principales de 187,1 m y 181,24 m de altura total respecto del encepado de pilotes. El tramo superior de cada torre, de 59,2 m de altura, acoge los anclajes del conjunto de 44 parejas de tirantes.

Tramos 8, 9 y 10: Con una longitud de 1200,75 m corresponde al descenso del puente hacia la margen de Puerto Real. Se trata de un puente de hormigón pretensado con sección cajón trícilular en los tramos 8 y 9 y losa aligerada en el tramo 9. El canto es de 3 m en el tramo 8 y de 2 m en el tramo 10.

3. ESTUDIO TEÓRICO

La información incluida en el presente artículo se centra en el tablero de los tramos 5, 6 y 7, viaducto atirantado del puente de la Constitución de 1812.

Este viaducto se construyó por avance del tablero en voladizo, por lo que además de las uniones soldadas en taller de cada una de las dovelas, presenta numerosas uniones soldadas ejecutadas en obra.

El trabajo se ha iniciado con la identificación de las zonas más tensionadas y por tanto más propensas a sufrir fenómenos de daño por fatiga y aparición de grietas. En estas zonas se han analizado las uniones existentes valorando la forma de trabajo de cada una y su estado tensional, lo que ha permitido elaborar un cuaderno con las soldaduras más críticas de estas zonas.

Teniendo en cuenta las uniones existentes, se han fabricado cuatro cupones representativos de estas uniones y se han hecho los ensayos necesarios para completar un estudio de integridad estructural de las

uniones reales, tendente a determinar la tenacidad a fractura del material y el tamaño de grieta crítico.

Los ensayos se han realizado sobre probetas obtenidas con los mismos materiales (calidades de acero) utilizados en el puente y con los mismos procedimientos de soldeo practicados en la estructura.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS MÁS SOLICITADAS DEL TABLERO

Para conocer las zonas más tensionadas del tablero se han realizado varios modelos de elementos finitos a los que se han aplicado las restricciones y acciones definidas en el proyecto del puente. De esta forma se han determinado las zonas del tablero más tensionadas.

El tablero del puente atirantado trabaja, grosso modo, de dos formas distintas en función de si existen o no tirantes próximos.

En la zona de tirantes la transmisión de esfuerzos se realiza en dirección perpendicular al tablero, es decir, los diafragmas transversales, comportándose como vigas bi-apoyadas, son los encargados de llevar las cargas desde el centro del tablero a los tirantes. En este modo de funcionamiento la losa superior de hormigón y por tanto el ala superior de los diafragmas se encuentran a compresión mientras que la parte inferior de los diafragmas transversales y las chapas inferiores del tablero se encuentran a tracción.

La zona del tablero que no tiene tirantes funciona, grosso modo como una viga de uno o dos vanos apoyada en las pilas y en la zona de tirantes. Esta viga presenta momentos flectores longitudinales negativos en los apoyos y vanos próximos a las pilas principales del puente y momentos flectores positivos en los vanos de compensación.

En cada una de las zonas del tablero se han seleccionado varias uniones soldadas que por su geometría o cambio de sección pueden ser propensas a fatiga o a aparición de fisuras. Estas uniones han sido identificadas en el EC3 [5] o en la EAE [2] obteniendo de cada una de ellas las categorías de detalle de fatiga.

A lo largo del documento se hace mención a las distintas chapas que conforman el tablero metálico. Para poder identificar fácilmente cada una de las chapas se las ha dado la numeración que se muestra en el esquema de la figura 3.

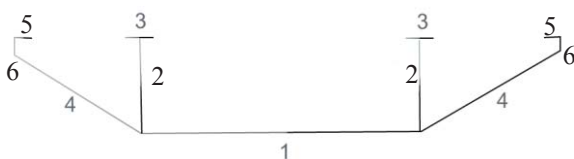


Figura 3. Identificación de chapas del tablero.

Las uniones analizadas en dirección transversal se muestran en la figura 4, incluyendo en la tabla 1 la categoría de detalle según EC3 [5].

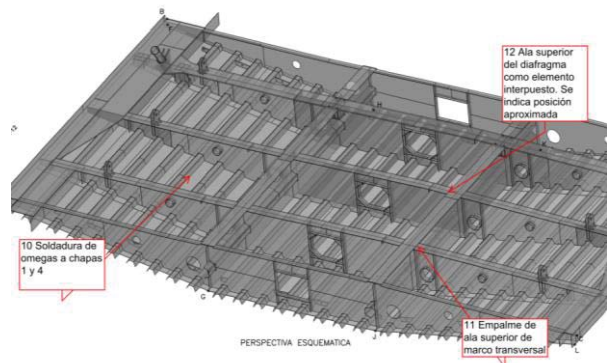


Figura 4. Detalles solicitados en dirección transversal.

Tabla 1. Resumen de detalles con tensiones normales en dirección transversal del tablero

Punto	Cat. Detalle
Soldadura de omegas a chapas 1 y 4	71
Empalme de ala superior de marco transversal	45
Ala superior del diafragma	40

Para el cálculo de las tensiones normales transversales del tablero, y la determinación de esfuerzos en la zona de tirantes, se ha elaborado un modelo tipo viga biapoyada, en el que los apoyos se corresponden con los tirantes. La sección considerada comprende un ancho eficaz de 3500 mm de acuerdo con la RPX-95 [6], dado que se toma la ley de momentos en transversal como una ley triangular resultando un coeficiente de reducción de la sección de 0.75.

A modo de ejemplo las tensiones normales transversales en ELU en las chapas 1 y 4 se muestran en la figura 5.

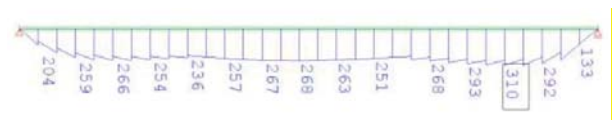


Figura 5. Tensiones normales transversales en chapas 1 y 4 (MPa).

Las uniones analizadas en dirección longitudinal se muestran en la figura 6, incluyendo en la tabla 2 la categoría de detalle según EC3 [5].

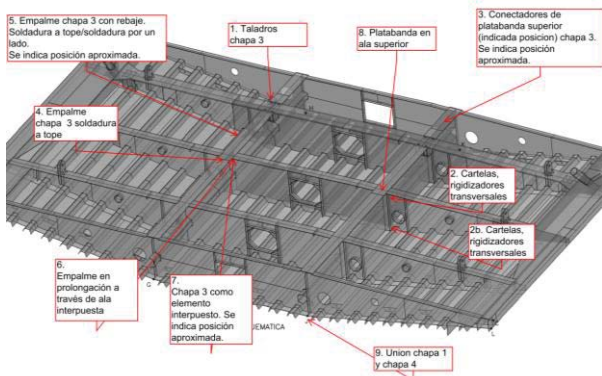


Figura 6. Detalles solicitados en dirección longitudinal.

Tabla 2. Resumen de detalles con tensiones normales en dirección longitudinal del tablero

Punto	Cat. Detalle
Taladros en chapa 3	90
Rigidizador transversal	71
Conectores	80
Empalme de chapa 3. Unión a tope	71
Empalme de chapa 3. Unión con rebaje	71
Empalmes en prolongación a través de ala interpuesta	45
Chapa 3 como elemento interpuesto	40
Platibanda en ala superior	45
Unión chapa 1 y chapa 4	71

Para el cálculo de las tensiones normales longitudinales en el tablero se ha elaborado un modelo completo del puente incluyendo tirantes y pilas. A partir de este modelo se han obtenido las tensiones en las distintas chapas de la sección del tablero.

A modo de ejemplo las tensiones normales longitudinales en ELU en la chapa 3 del tablero se muestran en la figura 7.

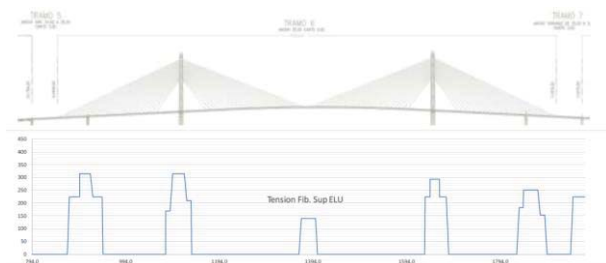


Figura 7. Tensiones normales longitudinales en ELU en la chapa 3.

5. CUPONES DE ENSAYO

Teniendo en cuenta las uniones identificadas como más susceptibles de sufrir fenómenos de fatiga se han definido cuatro uniones tipo representativas que responden a la mayor parte de las uniones objeto de estudio.

Se han fabricado cupones de ensayo de estas cuatro uniones tipo, diseñando las juntas a soldar y estableciendo las condiciones de soldadura para que fueran totalmente representativas de las uniones realizadas en obra. Las uniones ejecutadas se describen a continuación.

La primera unión es a tope ejecutada con respaldo mediante el procedimiento manual 136-FCAW según UNE-EN ISO 4063 [7]. Las chapas unidas son de 25 mm de espesor. En primer lugar se aplica el cordón de raíz para posteriormente completar el espesor con cordones de relleno. A continuación se retira el respaldo cerámico, se resana la raíz mediante arco aire, se amola la raíz con esmeril y se sueldan los cordones finales en techo, ver figura 8.

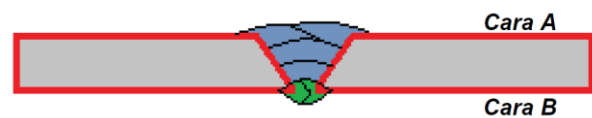


Figura 8. Unión a tope.

La segunda unión obedece a requerimientos propios de la ejecución de soldaduras en obra. En algunos casos la separación obtenida entre los bordes a soldar era superior a la estrictamente necesaria para la soldadura por lo que se optó por ejecutar un recrecido de las paredes de las chapas mediante cordones de soldadura para a continuación, una vez ejecutada la raíz completar el espesor con cordones de relleno. Esto hace que la cantidad de material de aportación sea sensiblemente mayor a la una unión con un talón reducido con lo que eso supone en cuanto a calor aportado, tensiones residuales, afección del metal base y deformaciones.

Se parte de un talón de 30 mm soldando en primer lugar un recrecido de 12 mm en la mitad del espesor de la chapa hasta dejar un talón de 6 mm. A continuación se amola el recrecido para conseguir una preparación en V con un talón máximo de 8 mm. Se suelda la raíz hasta completar el espesor de recrecido y a continuación se aplican cordones de relleno hasta completar el espesor de la unión. Se retira el respaldo cerámico, se resana la raíz con arco aire se, se amola la raíz con esmeril y se sueldan los cordones finales en techo, ver figura 9.



Figura 9. Unión a tope con recredido.

La tercera unión se realiza entre una chapa de 25 mm y otra de 40 mm con una transición 5 a 1. La unión es a tope con respaldo cerámico, ejecutándose la raíz mediante el procedimiento manual 136-FCAW y la soldadura de relleno mediante el procedimiento automático 121-SAW, ambos según UNE EN ISO 4063 [7]. En primer lugar se aplica el cordón de raíz, capas 1 y 2 con 136-FCAW, para posteriormente completar el espesor con cordones de relleno, 121-SAW. A continuación se retira el respaldo cerámico, se resana la raíz mediante arco aire, se amola la raíz con esmeril y se sueldan los cordones finales en techo, 136-FCAW, ver figura 10.

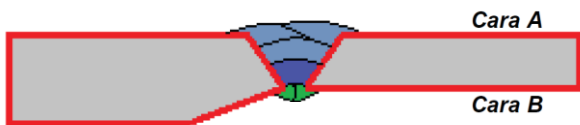


Figura 10. Unión a tope con cambio de espesor.

Una variante de la anterior simula la presencia de una falta de fusión en el bisel a medio espesor de la chapa. En esta probeta se escarnó el cordón de soldadura con arco-aire, se amoló la superficie con esmeril y se aplicaron los cordones de relleno, 136-FCAW, hasta completar el espesor, ver figura 11.

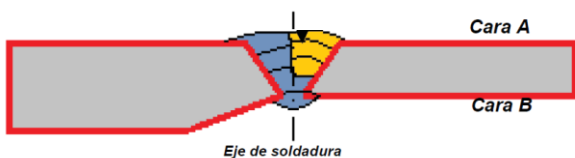


Figura 11. Unión a tope con cambio de espesor y reparación.

La cuarta unión es en T y se realiza entre una chapa de 25 mm y otra de 20 mm. La unión se ejecuta mediante el procedimiento manual 136-FCAW. En primer lugar se suelda la raíz primero por uno de los lados de la unión y después por el otro. A continuación se aplica una segunda capa por la cara A y una segunda capa por la cara B para finalmente soldar las capas de relleno hasta completar la garganta por la cara A y después por la cara B, ver figura 12.

De los cupones ejecutados se ha expedido un certificado garantizando que los materiales son los empleados en el puente y que las soldaduras se han realizado siguiendo los mismos procedimientos de obra.

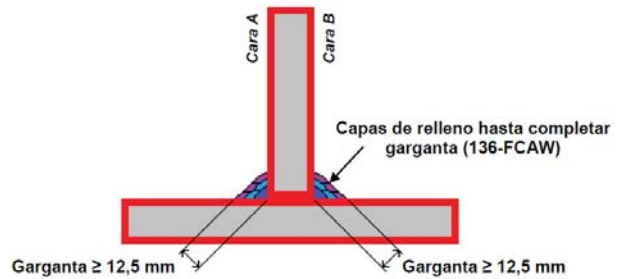


Figura 12. Unión en T.

De los cupones soldados se han extraído las probetas para los ensayos de tracción, fatiga, microestructura, durezas y tenacidad a fractura.

6. ENSAYOS DE TRACCION

El estudio de integridad estructural de las uniones soldadas se inicia con la determinación de las propiedades a tracción del material base, el cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente. De cada una de las probetas fabricadas se han realizado ensayos de tracción para compararlos con los requisitos mínimos asociados al acero S-355J2+N [8], que garantiza un límite elástico mínimo de 355 MPa, una tensión de rotura mínima de 470 MPa (para chapas con un espesor $3 < t < 100$ mm) y un alargamiento mínimo en rotura del 22%.

Se han realizado un total de 18 ensayos de tracción, 3 en cada una de las 6 zonas de interés: material base, cordón de soldadura y zona afectada térmicamente, todas en direcciones longitudinal y transversal al cordón de soldadura. Los ensayos se han realizado según la norma UNE EN ISO 6892-1 [9].

Tras analizar los datos obtenidos se ha podido comprobar que las probetas de material base ensayadas cumplen todas las especificaciones (límite elástico y tensión y deformación en rotura) correspondientes al acero S-355J2+N.

Las probetas del cordón de soldadura ensayadas, superan con gran margen de seguridad la tensión de rotura mínima especificada para los aceros S-355J2+N, mientras que la deformación bajo carga máxima obtenida es inferior a la especificada para el material base.

La probetas de la zona afectada térmicamente, del mismo modo que las probetas ensayadas en el cordón de soldadura, superan la tensión de rotura mínima especificada para el material base S-355, mientras que la deformación mínima exigida queda por debajo de la especificación de dicho material.

7. CARACTERIZACIÓN A FATIGA

El comportamiento a fatiga de las uniones se ha determinado tanto a nivel teórico (normativa) como a

nivel experimental. En este último caso los ensayos de fatiga se han realizado sobre probetas obtenidas con los mismos materiales (calidades de acero) utilizados en el puente y según los mismos procedimientos de soldadura practicados en la estructura. De esta manera se analiza el comportamiento a fatiga de las uniones ejecutadas en obra y se comprueba su similitud con los valores propuestos por la normativa.

Según el EC3 [5] la categoría de detalle corresponde a la clase FAT 71 para las uniones de las probetas fabricadas.

El programa experimental se ha realizado obteniendo las curvas S-N experimentales ensayando 48 probetas correspondientes a los cuatro tipos de uniones expuestas (en T, a tope, recrecido y rebaje). De cada tipo de unión se han ensayado 12 probetas con al menos 6 niveles de carga distintos; (ver ensayo de la unión en T en la figura 13). Los ensayos se han realizado siguiendo las especificaciones que indica la norma ASTM-E466-07 [10].



Figura 13. Ubicación, colocación y numeración de probetas.

Los resultados obtenidos muestran que la clase FAT para las uniones en T, a tope, recrecido y rebaje son respectivamente 75.57, 68.77, 85.18 y 79.69. En la figura 14 se muestra la gráfica con los resultados de fatiga de las probetas en T.

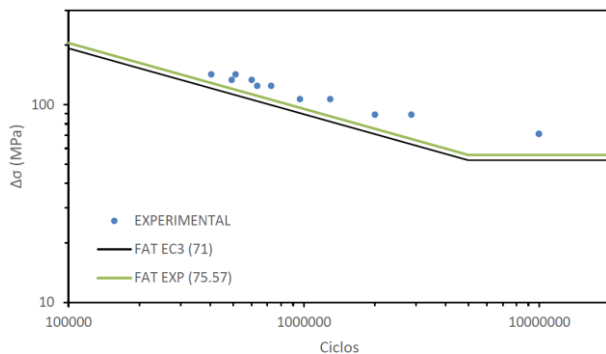


Figura 14. Resultados probetas en T.

Los puntos de rotura de las probetas se sitúan todos por encima de la curva S-N que marca la clase FAT indicada por el EC3 [5] (FAT 71) para las cuatro geometrías analizadas.

Las uniones a tope presentan una dispersión mayor a la esperada, dando lugar a una clase FAT experimental ligeramente inferior a la propuesta por el EC3 [5]. En todo caso los resultados experimentales quedan todos por encima de la curva del EC3.

El resto de las uniones ensayadas han cumplido la clase FAT requerida por el EC3 [5].

Los resultados obtenidos contribuyen a asegurar la validez de la ejecución en obra, pudiendo en todo caso emplear para el cálculo las categorías de detalle indicadas en la normativa.

8. DETERMINACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA Y DUREZA

Para la observación de la microestructura de todas las uniones soldadas se han preparado las muestras mediante pulido y ataque químico con Nital para revelar las diferentes regiones en el entorno de la soldadura (metal base, zona afectada térmicamente y cordones de soldadura), ver figura 15.

Además se ha determinado la dureza Vickers de los cordones de soldadura empleando un microindentador.

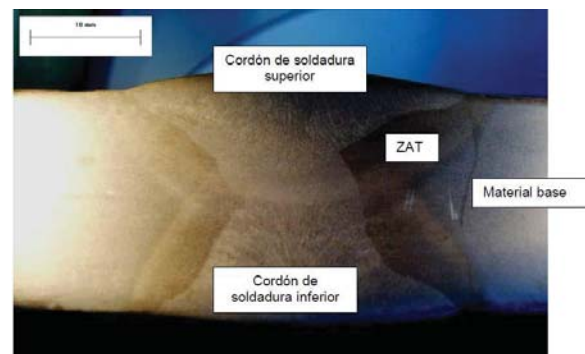


Figura 15. Regiones en el entorno de la soldadura.

Tras haber realizado todos los ensayos y analizado los resultados obtenidos de los mismos, las conclusiones obtenidas han sido:

- La dureza del material base, ZAT y cordón de soldadura en todas las uniones (a tope, recrecidas, rebajadas y en T), es adecuada de acuerdo al material que compone las probetas (valores máximos de 189 HV en material base, 304 HV en ZAT y 274 HV en el cordón de soldadura).
- Las microestructuras observadas se corresponden con el acero estructural que se está analizando.

Microestructura ferrítico-perlítica en metal base, ferrita acicular, perlita, bainita y martensita en la ZAT y ferrita acicular correspondiente al material de aporte.

9. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FRACTURA

Se ha determinado la tenacidad a fractura del material mediante ensayos J de probetas CT extraídas del material base, del cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente, habiéndose utilizado el parámetro K_J (en adelante K_{mat}) como parámetro característico a fractura. Para la ejecución de los ensayos J se han seguido las indicaciones que señala la norma ASTM E1820-13 [11].

Se han realizado 18 ensayos, 3 en cada una de las 6 zonas de interés: material base, cordón de soldadura y zona afectada térmicamente, todas en direcciones longitudinal y transversal al cordón de soldadura.

Las probetas CT son prefisuradas con la carga especificada en la norma hasta que la longitud de la fisura se sitúa en:

$$0.45 \cdot W \leq a_0 \leq 0.7 \cdot W \quad (1)$$

Donde:

W es el ancho de la probeta

a_0 es la longitud de la fisura

Teniendo en cuenta que la resistencia a fractura de un material disminuye cuanto menor es la temperatura a la que se encuentra y con el fin de asegurar una tenacidad mínima independiente de las condiciones climatológicas a las que se encuentre sometido el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, la campaña de ensayos se ha realizado a -20°C (condiciones claramente muy conservadoras).

La tenacidad a fractura del material se ha determinado a partir de las expresiones siguientes:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2)$$

$$J_{el} = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (3)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta \cdot A_{pl}}{B_N b_0} \quad (4)$$

Donde:

J es la integral J

J_{el} es la componente elástica de J

J_{pl} es la componente plástica de J

K_I es el factor de intensidad de tensiones

ν es el módulo de Poisson

E es el módulo de elasticidad

η es $2+0.522b_0/W$

A_{pl} es el área de la zona plástica

B_N es el espesor neto de la probeta

b_0 es el ligamento remanente inicial ($W-a$)

Como conclusiones se puede decir que:

- Para el ensayo se han considerado unas condiciones de trabajo muy conservadoras (-20°C), obteniendo valores de resistencia a fractura del lado de la seguridad.
- El valor de resistencia a fractura del material es elevado, $K_{mat} = 125,99 \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{0.5})$.

10. CARACTERIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES SOLDADAS

La caracterización de la integridad estructural de las uniones soldadas presentes en el Puente de la Constitución de 1812 se ha realizado determinando el tamaño de fisura que compromete la seguridad de la estructura. Para ello se han considerado las propiedades mecánicas de los materiales, la geometría de las uniones y al estado tensional de las mismas, tensiones nominales de tracción máximas (ELU).

Las evaluaciones de la integridad estructural se han realizado haciendo uso del Diagrama de Fallo definido según la opción 1 propuesta por la British Standard 7910 [12]: Lr frente a Kr, ver figura 16, en la que solo se requieren las propiedades a tracción del material (límite elástico y tensión de rotura).

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (5)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (6)$$

Donde:

K_r representa la situación frente a la fractura

L_r representa la situación frente al colapso plástico

K_I es el factor de intensidad de tensiones

K_{mat} es la resistencia a fractura del material

σ_{ref} es la tensión de referencia

σ_y es el límite elástico del material

En el estudio se han supuesto tres geometrías diferentes del defecto, fisura pasante y fisura semi-elíptica con relaciones de aspecto 0.1 y 0.5. Se ha analizado el inicio de propagación [12] y no se ha tenido en cuenta el efecto mismatch [12], hipótesis que proporcionan un margen de seguridad adicional frente al fallo final.

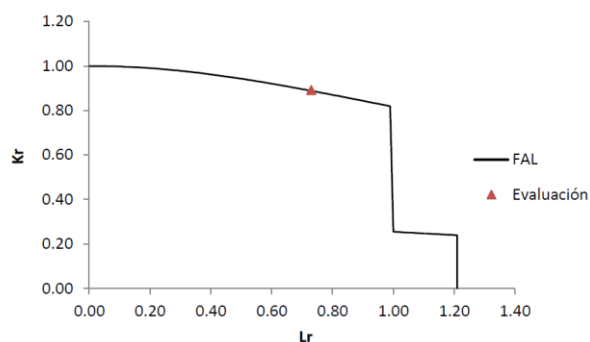


Figura 16. Evaluación de la integridad estructural empleando el Diagrama de Fallo.

La tensión de referencia se obtiene a partir del compendio de soluciones propuesto por la BS 7910 [12], para la cual es necesario conocer las tensiones nominales que actúan sobre la estructura a analizar (tensiones primarias, de origen mecánico). Las tensiones secundarias (tensiones residuales provocadas por el proceso de soldeo) no intervienen. La definición del factor de intensidad de tensiones requiere tener en cuenta tanto las tensiones mecánicas que actúan sobre la estructura (primarias) como las tensiones residuales (secundarias), consecuencia del proceso de soldeo. Las tensiones residuales propuestas por la BS 7910 [12] varían en función del tipo de unión soldada a analizar. Además, hay que tener en cuenta la componente de autoequilibrio del perfil de tensiones residuales (K_{sb}). En todos los casos las uniones soldadas analizadas se asemejan a placas infinitas.

$$K_I = [(Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s] \cdot \sqrt{\pi a} + K_{sb} \quad (7)$$

Donde:

K_I es el factor de intensidad de tensiones

$(Y\sigma)_p$ son las tensiones sobre la estructura (primarias)

$(Y\sigma)_s$ son las tensiones residuales (secundarias)

a es el tamaño de grieta

K_{sb} es la componente de autoequilibrio del perfil de tensiones residuales

En las tablas 3 a 8 se muestran algunos de los valores de fisura crítica (a_c) obtenidos en un punto concreto del tablero y para las 3 hipótesis de geometría de fisura consideradas. Para su correcta interpretación hay que tener en cuenta que en el caso de fisuras pasantes a_c es la semi-longitud de fisura y que en las fisuras elípticas el tamaño del ancho de fisura observado en superficie es 2 y 10 veces mayor que a_c para relaciones de aspecto de 0.5 y 0.1, respectivamente.

Tabla 3. Valores de fisura crítica en uniones a tope (dirección longitudinal del tablero).

PK	Punto superior	Tensión (MPa)	Espesor sup (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
886	1	224	20	10.4	10.6	6.1

Tabla 4. Valores de fisura crítica en uniones en T (dirección longitudinal del tablero).

PK	Punto superior	Tensión (MPa)	Espesor sup (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
886	1	224	20	13	10.6	6.1

Tabla 5. Valores de fisura crítica en uniones con cambio de espesor (dirección longitudinal del tablero).

PK	Punto superior	Tensión (MPa)	Espesor sup (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
886	1	224	20	10.4	10.6	6.1

Tabla 6. Valores de fisura crítica en uniones a tope (dirección transversal del tablero).

Zona	Chapa	Tensión (MPa)	Espesor (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
Bajo tirantes	Fondo lat (4)	310	12	7	3.4	1.8

Tabla 7. Valores de fisura crítica en uniones en T (dirección transversal del tablero).

Zona	Chapa	Tensión (MPa)	Espesor (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
Bajo tirantes	Fondo lat (4)	310	12	8.7	3.4	1.8

Tabla 8. Valores de fisura crítica en uniones con cambio de espesor (dirección transversal del tablero).

Zona	Chapa	Tensión (MPa)	Espesor (mm)	a_c (mm)		
				Fisura pasante	Fisura semielíptica ($a/2c=0.5$)	Fisura semielíptica ($a/2c=0.1$)
Bajo tirantes	Fondo lat (4)	310	12	7	3.4	1.8

11. CONCLUSIONES

En el marco del plan de inspección y mantenimiento del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, se ha incorporado un apartado para la inspección de fisuras en el tablero focalizando puntos concretos donde la inspección debe ser más cuidadosa.

Los resultados obtenidos muestran que los tamaños de grieta críticos, fisura pasante, rondan los 12 mm, teniendo detalles estructurales con tamaños de grieta críticos, fisura pasante, de tan solo 6 mm.

REFERENCIAS

- [1] Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento (2008).
- [2] Instrucción de acero estructural EAE. Ministerio de Fomento (2011).
- [3] Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-11. Ministerio de Fomento (2011).

[4] PEDRAZO MAJÁRREZ, F. “Introducción al Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz”. *Hormigón y Acero*. 2016, vol. 67, número 278-279.

[5] EN 1993-1-9, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. European Committee for Standardization (CEN). 2005.

[6] RPX-95 Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos de carretera. Ministerio de fomento. (2003).

[7] UNE-EN ISO 4063. Soldeo y técnicas conexas. Nomenclatura de procesos y números de referencia. (2011).

[8] EN 10027-1:2006, Sistemas de designación de aceros. Parte 1: Designación simbólica. European Committee for Standardization (CEN). 2006.

[9] EN ISO 6892-1:2010, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayos a temperatura ambiente. European Committee for Standardization (CEN). 2010.

[10] ASTM E466-07, Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials. American Society for Testing and Materials. 2007.

[11] ASTM E1820-13, Standard test method for measurement of fracture toughness. American Society for Testing and Materials. 2013.

[12] BS 7910: 2013, “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”, British Standards Institution, London (2013).